

Jesse Toivanen

LANGATON TIEDONSIIRTO NÄKYVÄLLÄ VALOLLA

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaatintyö
Kesäkuu 2019

TIIVISTELMÄ

Jesse Toivanen: Langaton tiedonsiirto näkyvällä valolla
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan koulutusohjelma
Kandidaatintyö
Kesäkuu 2019

Langattomasti tietoverkkoihin yhteydessä olevien laitteiden lukumäärä kasvaa jatkuvasti, mikä aiheuttaa haasteita muun muassa ruuhkautuvien radiotaajuuskaistojen vuoksi. Tässä kandidaatintyössä tutustutaan näkyvällä valolla tapahtuvaan langattomaan tiedonsiirtoon (VLC), joka on yksi mahdollinen ratkaisu vähentää ruuhkaa radiotaajuuksilla. Keskeistä on myös se, että näkyvä valo ei läpäise esteitä yhtä hyvin kuin radioaallot, mikä voi olla joko hyvä tai huono asia riippuen sovelluskohteesta.

Työssä tarkastellaan ensin optista langatonta tiedonsiirtoa yleisesti, minkä jälkeen keskitytään tarkemmin VLC-tekнологiaan ja sen mahdollisiin tulevaisuuden käyttökohteisiin. Lisäksi työssä mainitaan näkyvää valoa hyödyntävään tietoliikenteeseen keskittyviä yrityksiä ja standardointiorganisaatioita. Kirjallisuuskatsauksen lisäksi työhön sisältyy mittauksia tutkimuskäyttöön saadulla VLC-testilaitteistolla, johon sisältyy tukiasema ja päätelaite.

Kirjallisuuslähteistä kerätyn tiedon sekä mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että VLC:llä on mahdollisuus tulla yksi tulevaisuudessa käytettävistä langattomista lähiverkkotekniikoista, mutta tällä hetkellä kaupallisia tuotteita on hyvin vähän, eivätkä niiden hinnat ole vielä peruskuluttajille sopivalla tasolla. Myöskään yhteyden toimintavarmuus aidoissa käyttöolosuhteissa ei ole välttämättä vielä laajemman käytön vaatimalla tasolla.

Avainsanat: lähiverkko, näkyvä valo, optinen tiedonsiirto, tietoliikenne

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen yliopiston Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunnalle keväällä 2019.

Haluan esittää lämpimät kiitokseni työni ohjaajalle ja läpi työprosessin minua auttaneelle Markus Allénille, jonka ansiosta myös työssä käytetty testilaitteisto saatiin hankittua.

Lisäksi kiitoksen ansaitsevat perheeni ja ystäväni, joiden seurassa niin opiskeluista kuin niiden ulkopuolisistakin asioista johtuva stressi helpottaa.

Tampereella, 12.6.2019

Jesse Toivanen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. OPTINEN LANGATON TIEDONSIIRTO YLEISESTI.....	2
3. NÄKYVÄN VALON TIETOLIIKENNE	5
3.1 VLC ja Li-Fi	5
3.2 Näkyvän valon tiedonsiirtoon perustuvia standardeja	8
3.3 Yrityksiä ja konsepteja	8
4. MITTAUKSET	11
4.1 Laitteisto ja mittausympäristö	11
4.2 Mittaustulokset.....	16
4.2.1 Suora mittaus.....	16
4.2.2 Sivuttaismittaus.....	18
4.2.3 Vaakamittaus	20
5. YHTEENVETO.....	23
LÄHTEET.....	24

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3G	engl. Third generation, kolmannen sukupolven mobiiliverkko
4G	engl. Fourth generation, neljännen sukupolven mobiiliverkko
5G	engl. Fifth generation, viidennen sukupolven mobiiliverkko
dB	desibeli, logaritminen tehosuureiden suhdetta kuvaava yksikkö
b/s	bittinä sekunnissa, tiedonsiirtonopeuden yksikkö
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen tekniikan alan järjestö
IM/DD	engl. Intensity Modulation/Direct Detection, optisessa tiedonsiirrossa käytettävä modulaatiotekniikka
IoT	engl. Internet of Things, esineiden internet
IrDA	engl. Infrared Data Association, infrapunaä käyttävää tiedonsiirtoa kehittävä järjestö
LED	engl. light-emitting diode, valoa säteilevä puolijohdekomponentti
Li-Fi	engl. Light Fidelity, optinen tiedonsiirtotekniikka
LOS	engl. Line of Sight, suora näköyhteys kahden kohteen välillä
MWC	engl. Mobile World Congress, vuosittain järjestettävä mobiilialan messutapahtuma
OWC	engl. Optical Wireless Communications, tiedonsiirto ultraviolettivalon, infrapunavalon tai näkyvän valon avulla
PLC	engl. Powerline Communications, tiedonsiirto sähköverkossa
PoE	engl. Power over Ethernet, laitteen virransyöttö verkkoliikenteeseen käytettävän Ethernet-kaapelin avulla
RF	engl. Radio Frequency, radiotaajuusalue, 3 kHz – 300 GHz
SNR	engl. signal-to-noise ratio, signaalin ja kohinan välinen suhdeluku
UWB	engl. Ultra Wideband, radioteknologia, jossa tietoa lähetetään lyhyinä pulsseina laajalla taajuuskaistalla
VLC	engl. Visible Light Communication, tiedonsiirto näkyvän valon taajuusalueella
VLCC	engl. Visible Light Communication Consortium, japanilainen näkyvän valon tietoliikenteeseen keskittyvä työryhmä
Wi-Fi	engl. Wireless Fidelity, radiotaajuuksilla toimiva lähiverkkotekniikka, IEEE 802.11
WLAN	engl. Wireless Local Area Network, langaton lähiverkko

1. JOHDANTO

Modernin yhteiskunnan digitalisaation myötä toisiinsa yhteydessä olevien laitteiden määrä kasvaa koko ajan. Termiä esineiden internet (IoT) käytetään yleisesti tulevaisuuden tietoverkoista puhuttaessa, kun halutaan erityisesti korostaa laitteiden suurta lukumäärää ja monimuotoisuutta. Laitemäärän kasvu asettaakin erilaisia haasteita perinteisille radiotaajuuksia hyödyntäville langattomille tiedonsiirtojärjestelmille, sillä käyttökeloisimmat radiotaajuudet ovat jo aktiivisessa käytössä. Suurien tietoverkkojen ylläpitämiseen vaaditaan myös runsaasti energiaa, joten ympäristöllisetkin näkökulmat ovat tämän päivän tietoverkkosuunnittelussa tärkeitä. Yksi mahdollinen ratkaisu näihin ongelmiin on tutkimuksen ja kehityksen alla oleva optinen langaton tiedonsiirto (OWC) ja näkyvän valon hyödyntäminen tiedonsiirrossa valoa säteilevien hohtodiodien (LED) avulla.

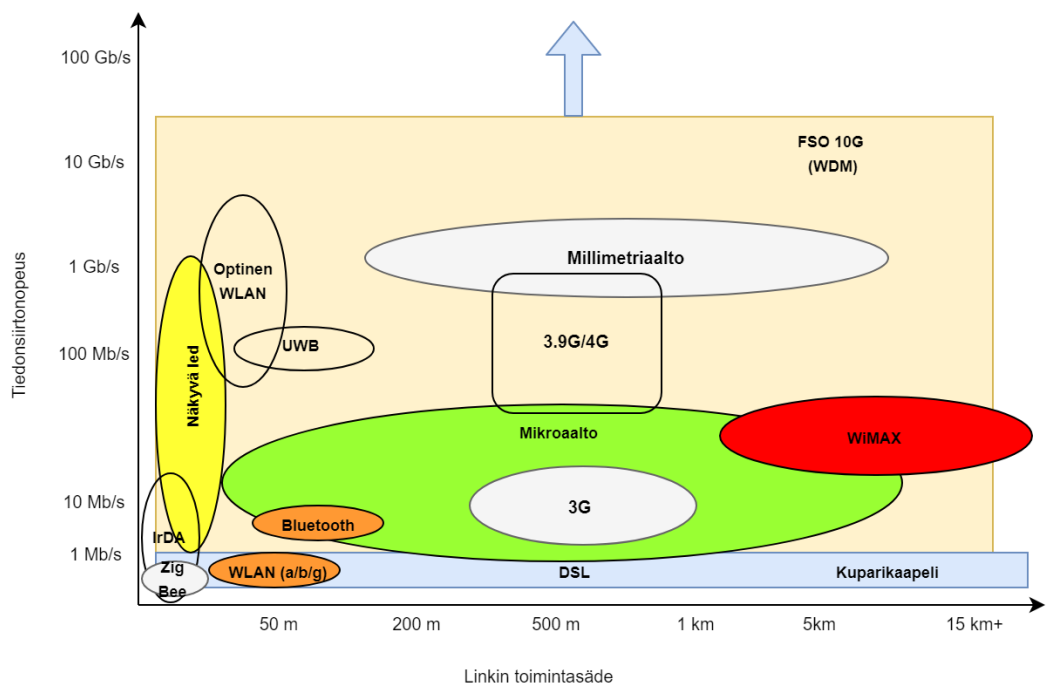
Tässä työssä tarkastellaan erityisesti näkyvän valon langatonta tietoliikennettä (VLC) ja sen eroja radiotaajuuksilla toimiviin tiedonsiirtojärjestelmiin nähden. Optinen tiedonsiirto yleisestikin on tarkastelun kohteena, sillä usein VLC-järjestelmissä näkyvän valon lisäksi käytetään myös esimerkiksi infrapunavaloa. Työssä tehdään myös mittauksia tutkimuskäyttöön saadulla VLC-laitteistolla.

Aluksi työn luvussa 2 tarkastellaan optista langatonta tiedonsiirtoa yleisesti sekä sen mahdollisia hyötyjä ja rajoitteita. Luvussa katsotaan langatonta optista tiedonsiirtoa niin lyhyen kuin pitkänkin matkan tiedonsiirtoyhteyksien näkökulmasta. Luvussa 3 perehdytään varsinaiseen näkyvällä valolla tapahtuvaan langattomaan tiedonsiirtoon ja tutustutaan VLC:hen pohjautuviin standardeihin sekä aiheeseen keskittyneisiin yrityksiin. Luvussa 4 tehdään VLC-laitteistolla konkreettisia mittauksia, joissa tutkitaan muun muassa tiedonsiirtonopeuksia ja pakettihävikkiä. Luvussa 5 tehdään yhteenveto VLC:stä ja sen tulevaisuudesta saatavilla olevan tiedon ja mittauksien perusteella.

2. OPTINEN LANGATON TIEDONSIIRTO YLEISESTI

Perinteisten radioaaltotekniikkojen rinnalle kehitetty OWC hyödyntää sähkömagneettista säteilyä 350–1550 nanometrin aallonpituuksilla. Tällöin tiedonsiirron taajuusalue kattaa ultraviolettivalon, infrapunavalon ja näkyvän valon [1]. Optisessa tiedonsiirrossa käytetään lyhyillä välimatkoilla yleensä ledejä, kun taas ulkotiloissa pidemmällä välimatkoilla voidaan käyttää lasereita. Tällöin puhutaan yleisesti optisesta tiedonsiirrosta vapaassa tilassa (FSO) [2]. Näkyvän valon taajuusalueella kyseessä on näkyvän valon tietoliikenne (VLC) [3], josta on mediassa käytetty myös nimitystä valodata [4]. Infrapunavaloa on käytetty jo pitkään muun muassa audio- ja videolaitteiden kaukosäätimissä ja autojen lukitusjärjestelmissä. Myös mobiililaitteissa, kuten matkapuhelimissa ja kannettavissa tietokoneissa, on käytetty Infrared Data Associationin (IrDA) määrittelemää standardia lyhyen matkan tiedonsiirrossa [5].

Optinen tiedonsiirto perustuu tyypillisesti valonlähteen amplitudimodulaatioon. Tätä tekniikkaa kutsutaan usein intensiteettimodulaatioksi suoralla ilmaisulla (IM/DD). Valosignaalin vastaanotto tapahtuu valoilmaisimilla (photodetector), jotka koostuvat yleensä fotodiodeista. Fotodiodit muuntavat vastaanottamansa optisen tehon sähkövirraksi [3].



Kuva 1. Tiedonsiirtonopeuksien ja toimintasäteiden vertailu eri tiedonsiirtojärjestelmien välillä. Muokattu lähteestä [6].

Kuvassa 1 on esitettyä erilaisten langattomien järjestelmien tiedonsiirtonopeuksia ja toimintasäteitä. Optisella tiedonsiirrolla voidaan saavuttaa nykyisellä teknologialla tiedonsiirtonopeuksia, jotka ovat 1–30 Gb/s [6], mutta esimerkiksi Marcos Katz Oulun yliopistosta väittää, että laboratorio-olosuhteissa tiedonsiirtonopeudeksi on saatu 200 Gb/s [4].

Ulkotiloissa käytettävät FSO-järjestelmät käyttävät tiedonsiirtoon erittäin kapeita lasersäteitä, joiden taajuus on yli 300 GHz. FSO-järjestelmien on ajateltu olevan ratkaisu loppukäyttäjän yhdistämiseksi olemassa olevaan valokuituverkkoon helposti ja halvalla. Mahdollisia käyttökohteita FSO-järjestelmille ovat esimerkiksi rakennusten väliset nopeat yhteydet, valvontalaitteet, varayhteydet poikkeustilanteissa sekä tapahtumien lähetyks suuressä yleisölle paikoista, joissa ei ole tarvittavia kiinteitä yhteyksiä [2].

Valon käyttämiseen tiedonsiirrossa liittyy monia etuja. Esimerkiksi suuri osa nykyisistä radiotaajuuksista (RF) käyttävistä laitteista toimii 2,4 GHz:n taajuusalueella, mikä aiheuttaa ruuhkaa tilassa, jossa toimii paljon laitteita kyseisellä taajuusalueella [3]. Valon taajuusalueella puolestaan ei ole varattuja taajuuksia ja kaistanleveys radion taajuuskaistiaan verrattuna on paljon suurempi, joten vapaata taajuuskaistaa on runsaasti. Valo- ja radiosignaalit eivät myöskään aiheuta toisilleen häiriötä, joten valon käyttäminen vähentäisi ruuhkaa radiotaajuuksilla laitteiden määrän jatkuvasti kasvaessa. Lisäksi valo ei läpäise rakenteita, joten esimerkiksi signaalit vierekkäisissä huoneissa eivät aiheuta toisilleen häiriötä. Tämä helpottaa resurssien uudelleenkäyttöä, jolloin verkosta saadaan tiheä ja sen kapasiteetti kasvaa. Myös tietoturva paranee, sillä signaalia ei voi kaapata seinien tai muiden valoa läpäisemättömien esteiden läpi [6]. Tietoturva ei ole kuitenkaan täydellinen, sillä esimerkiksi tutkimuksen [7] mukaan valosignaalia on mahdollista salakuunnella ulkopuolelta esimerkiksi ikkunan kautta. Yksi langattoman optisen yhteyden suuri etu langalliseen valokuituyhteyteen verrattuna on puolestaan vaivattomampi asennus, koska OWC-järjestelmät eivät vaadi pitkiä maahan kaivettavia kaapeleita [8].

Valoa hyödyntävissä langattomissa järjestelmissä on myös haasteita. Esimerkiksi ilmakehän olosuhteet voivat vaikuttaa merkittävästi FSO-järjestelmän toimintaan. Muun muassa savu, sumu, vesi ja lumisade aiheuttavat suurta tehonvaimennusta, siroamista ja absorptiota valonsäteille, minkä seurauksena järjestelmän toimintasäde pienenee ja bit-tivirheen todennäköisyys kasvaa [6]. Taulukosta 1 nähdään, että laservalon vaimentuminen vaihtelee suuresti eri olosuhteissa.

Taulukko 1 Laservalon vaimentuminen eri olosuhteissa [6].

Säätila	Vaimentuminen (dB/km)
erittäin selkeä	0,2
vesisade (noin 150 mm/h)	20–30
lumisade	> 45
erittäin tiheä sumu	350

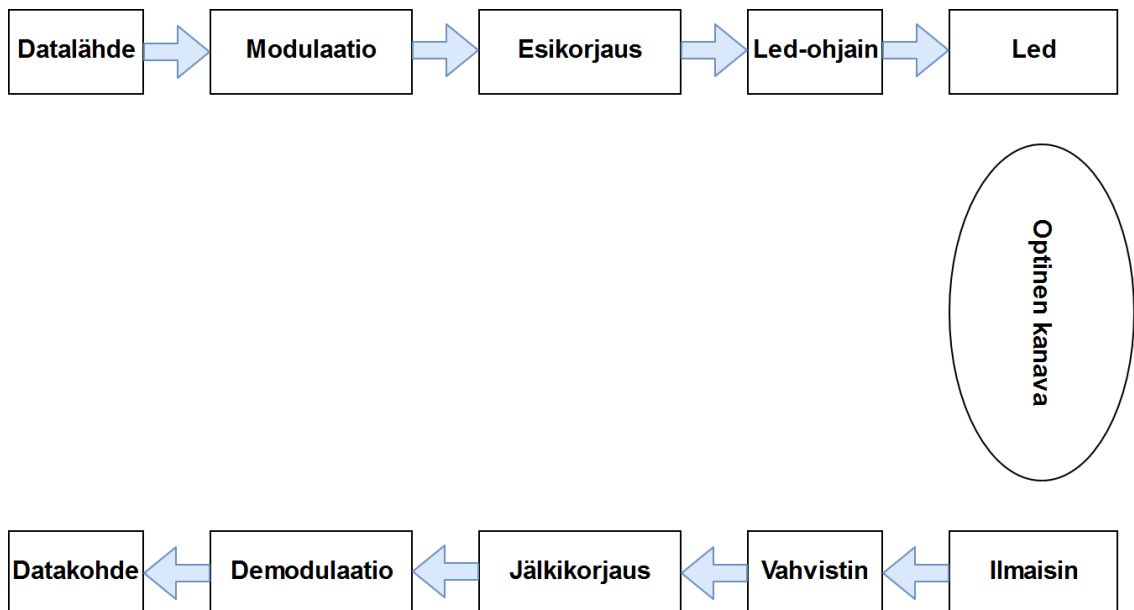
Parhaan suorituskyvyn saavuttamiseksi lähettimen ja vastaanottimen välillä tulee olla myös suora näköyhteys (LOS) [6]. Tämä rajoittaa optisten langattomien järjestelmien tehokasta käyttöä esimerkiksi alueilla, joilla on suuria korkeuseroja ja paljon näköesteitä, kuten puita. Myös auringonvalo laskee tiedonsiirtonopeutta varsinkin ulkotiloissa. Yhteys heikkenee valosignaalin peittyessä auringonvalon aiheuttaman kohinan alle, jos fotodiodit joutuvat suoraan kontaktiin auringonvalon kanssa. Tämä rajoittaa nopeiden optisten yhteyksien käyttöä ulkona päivänvalossa. OWC-järjestelmät soveltuvatkin parhaiten lyhyiden välimatkojen yhteyksiin sisätiloissa mobiliteetin ja peittoalueen rajallisuuden vuoksi [8]. OWC ja VLC eivät siis tule täysin korvaamaan nykyisiä radiotekniikkaan perustuvia järjestelmiä, kuten langattomia lähiverkkoja tai mobiiliverkkoja [6].

3. NÄKYVÄN VALON TIETOLIIKENNE

Optisessa tiedonsiirrossa hyödynnetään sähkömagneettisen säteilyn spektriä ultraviolettivalosta infrapunavaloon. Kun rajataan spektri kattamaan vain näkyvä valo, puhutaan näkyvän valon tietoliikenteestä, joka on osa OWC:tä [9].

3.1 VLC ja Li-Fi

Yleisesti VLC-järjestelmissä lähettiminä toimivat ledit, esimerkiksi valkoiset ledit, vastaanottiminä fotodiodit ja siirtokanavana ilma. Ledien säteilemä valo on näkyvän valon aallonpituusalueella, joka on noin 380–780 nanometriä. Varsinainen tiedonsiirto tapahtuu muuttamalla valon intensiteettiä eli tehoa ajan suhteen. Näkyvää valoa hyödyntävästä tiedonsiirrosta on käytetty myös termiä Li-Fi. Li-Fi kuvaa langatonta kaksisuuntaista verkotettua tiedonsiirtoa, joka muistuttaa paljon langatonta RF-lähiverkkotekniikkaa (Wi-Fi). Se on siis pienellä alueella toimiva langaton verkko, joka voi yhdistää useita laitteita samalla alueella internetiin [10].



Kuva 2. Yksinkertainen lohkokaavio VLC-järjestelmästä. Muokattu lähteestä [9].

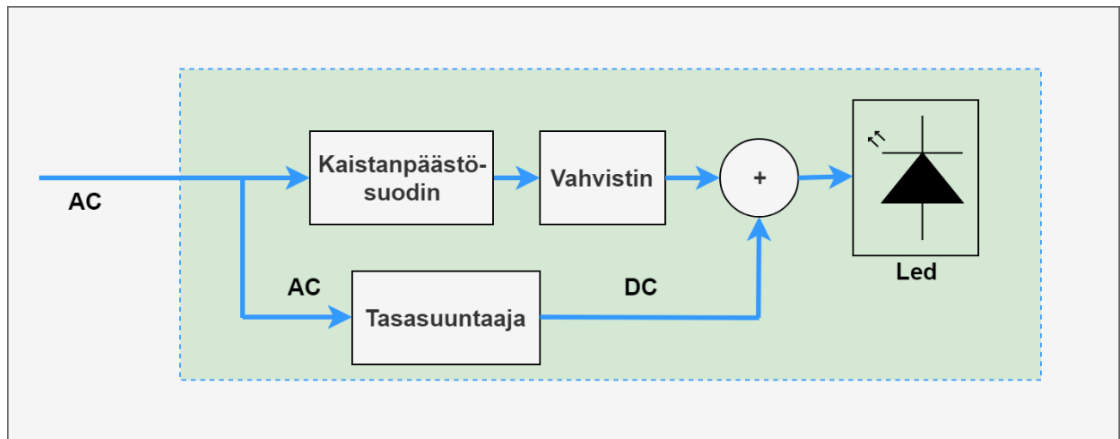
Kuvassa 2 on esitetty VLC-järjestelmän lohkokaavio. Kaavio muistuttaa hyvin paljon RF-tiedonsiirtojärjestelmän lohkokaaviota. Eroja on kuitenkin muun muassa tiedonsiirtokanavan ominaisuuksissa sekä lähetettävän signaalin muodostamisessa ja vastaanottamisessa, joissa VLC:n tapauksessa käytetään led-ohjaimia (engl. LED driver), ledejä sekä fotodiodi-ilmaisimia. Led-ohjain on virtalähde, joka säätelee ledille syötettävää tehoa tietoliikennesignaalin mukaisesti.

VLC:tä voidaan käyttää niin suurta kuin pientäkin tiedonsiirtonopeutta vaativissa järjestelmissä. Mahdollisia korkean tiedonsiirtonopeuden käyttökohteita ovat esimerkiksi alalinkkiyhteys yleiseen valaistukseen käytettävien ledien kautta päätelaitteisiin. Sisätiloissa tällaisessa järjestelmässä on paljon tilallista monikäyttöä seinien aiheuttaman LOS:n puutteen vuoksi. Sisätiloissa käytettävä paikannus useiden valaisimien avulla on puolestaan esimerkki VLC-järjestelmästä, jossa tarvittava tiedonsiirtonopeus on pieni. Korkean tiedonsiirtonopeuden VLC-järjestelmät vaativat tehokkaita fotodiodi-ilmaisimia, kun taas matalan tiedonsiirtonopeuden järjestelmissä alalinkkiyhteyteen riittää mobiililaitteissa jo valmiina oleva laitteisto, kuten kamera [3].

VLC-järjestelmät eivät vaadi monimutkaisia kanavanseuranta-algoritmeja, sillä valosignaalin sisältämä konstruktiivinen ja destruktiivinen interferenssi on tuhansia kertoja pienempää kuin fotodiodi-ilmaisimen koko. Kanava säilyy siis käytännössä ajan suhteen muuttumattomana vastaanottimen näkökulmasta. Valon varjostuminen voi aiheuttaa yhteydessä katkoksia, mutta automaattinen uudelleenlähetyspyyntö on ratkaisu tähän [3].

Ennen kuin data voidaan lähettää valosignaalin, täytyy se saada led-valaisimelle jotakin välityskanavaa pitkin. Valaisimet ovat yleensä yhteydessä sähköverkkoon, joten yksi mahdollinen ratkaisu on tiedonsiirto sähköverkkoa pitkin (PLC). Tässä tapauksessa käytetään DMT-modulaatiota (Discrete Multitone), joka jakaa kanavan useaan rinnakkaiseen taajuustasossa tasaiseen kanavaan, jotka eivät häiritse toisiaan. Tämä ratkaisu yksinkertaistaa VLC-signaalin lähettämistä, koska PLC-modeemia voidaan käyttää myös ledin modulointiin [3].

PLC-signaali vääristyy rajusti matkalla led-siruun, mikä pitää korjata vastaanottopäässä. Lisäksi led-valaisin vaatii syttyäkseen tasavirtaa. Tämä voidaan ratkaista tasasuuntaajalla, joka muuntaa vaihtovirran tasavirraksi. Tasasuuntaaja kuitenkin poistaa sähköverkosta saapuvan signaalin, joten valaisinta on muokattava, jotta PLC-signaali pääsee tasasuuntaajan ohi [3]. Kuvassa 3 on esitettyä muokatun led-valaisimen rakenne.



Kuva 3. Led-valaisimeen vaadittavat muutokset PLC-signaalin VLC-signaaliksi muuntamiseksi. Muokattu lähteestä [3].

PLC:n lisäksi mahdollinen keino siirtää dataa ja virtaa samaa johdinta pitkin on virransyöttö Ethernet-kaapelin avulla (PoE). Vuonna 2003 standardoitu PoE käyttää virran siirtoon kahta tai useampaa Ethernet-kaapelin neljästä kierrettyjä parikaapelista. Virransyöttämiseksi PoE-verkkoon tarvitaan lisäksi PoE-injektori, joka voi olla esimerkiksi PoE-standardia tukeva verkkokytin. Virransyöttöön käytetään joko kahta johdinparia, joita ei käytetä tiedonsiirtoon, tai samoja johdinpareja, joita käytetään tiedonsiirtoon. Signaalointi on toteutettu Ethernet-kaapelissa siten, että kaapelissa datan kanssa samaan aikaan kulkeva tasavirta ei häiritse tiedonsiirtoa. Ensimmäisen standardin (IEEE 802.3af) tukeva liitetyn laitteen suurin mahdollinen tehonkulutus on noin 13 W. Tämä ei ole välttämättä vielä riittävä teho VLC-järjestelmälle. Myöhemmät standardit tukevat kuitenkin suurempia tehoja, esimerkiksi vuonna 2009 hyväksytyn standardin IEEE 802.3at ("PoE+") maksimisyöttöteho yhdelle laitteelle on noin 30 W. Viimeisin vuonna 2018 hyväksytty standardi IEEE 802.3bt ("4PPoE") tukee jopa 100 W:n syöttötehoa, mutta laitteelle asti tuleva teho on tehohäviöiden vuoksi noin 70 W. Uusimmilla standardeilla PoE on siis varteenotettava ratkaisu VLC- ja Li-Fi-järjestelmissä vähentämään valmistus- ja asennuskustannuksia poistamalla tarpeen ylimääräisille kaapeleille ja korkeajännitteisille vaihtovirtapiireille. [11]

Yhteys vaatii myös ylälinkin päätelaitteen lähettämiä pyyntöjä ja kuittauksia varten. Joissakin ratkaisuissa tämä tapahtuu infrapunälähtetimen avulla, mutta esimerkiksi mobiililaitteissa ylälinkki voidaan toteuttaa laitteissa jo olevan Wi-Fi-teknologian avulla. VLC-kanavan SNR-tietoja (signal-to-noise ratio) voidaan välittää Wi-Fi:n avulla reitittimelle, joka saadun tiedon perusteella voi muokata VLC-alalinkin parametreja, kuten kanavan kaistanleveyttä. Myös päätelaitteeseen kulloinkin yhteydessä oleva tukiasema voidaan määrittää Wi-Fi-yli-linkin tiedoilla [3].

3.2 Näkyvän valon tiedonsiirtoon perustuvia standardeja

VLC:hen liittyviä standardeja on määritelty jo useita viimeisen 15 vuoden aikana. Ensimmäinen näkyvän valon tietoliikenteeseen keskittynyt työryhmä oli vuonna 2003 Japanissa perustettu Visible Light Communication Consortium (VLCC) [9]. Se esitteli näkyvään valoon perustuvat tunniste- ja lähetinstandardit CP-1221 ja CP-1222 vuonna 2008.

Kansainvälinen tekniikan alan järjestö Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) hyväksyi VLC-standardin 802.15.7 vuonna 2011. IEEE 802.15.7 määrittelee fyysisen kerroksen ja siirtoyhteyshieroksen lyhyen matkan optiselle langattomalle tiedonsiirrolle näkyvällä valolla. Standardi pyrkii lisäämään erilaisia käyttökohteita langattomalle optiselle tiedonsiirrolle. Näitä ovat esimerkiksi ledejä hyödyntävä tunnistusjärjestelmä LED-ID ja Li-Fi. Standardi nähdään mahdollisena osana tulevaisuuden 5G-verkkoja [9].

Vuonna 2016 IEEE perusti Light Communication -nimisen ryhmän (Topic Interest Group) aiheesta kiinnostuneille yrityksille ja muille organisaatioille. Sen tavoitteena oli Li-Fin liittäminen IEEE:n langattoman lähiverkon standardiin 802.11. Maaliskuussa 2018 IEEE:n standardiyhdistysten standardilautakunta hyväksyi valotiedonsiirron lisäämisen standardiin ja työryhmä (Task Group) 802.11bb perustettiin määrittämään tekniset yksityiskohdat. Työryhmälle on asetettu tavoitteeksi muun muassa se, että tiedonsiirto tapahtuu 380–5000 nanometrin aallonpituuksilla, kaikkien fyysisen kerroksen toimintatilojen tiedonsiirtonopeuksien on oltava vähintään 10 Mb/s yhdellä laitteella ja yhden toimintatilan tiedonsiirtonopeuden on oltava vähintään 5 Gb/s yhdellä laitteella [12]. Standardin on suunniteltu olevan valmis vuonna 2021 [13].

3.3 Yrityksiä ja konsepteja

Lukuisat yritykset kehittävät tulevaisuuden VLC- ja Li-Fi-järjestelmiä. Näitä ovat esimerkiksi Signify ja ranskalaiset LUCIOM sekä Oledcomm. Li-Fi-yritykset tekevät myös yhteistyötä toistensa sekä suurempien tekniikan alan yritysten, kuten Ciscon ja Hewlett Packardin, kanssa. Erilaisia kaupallisia Li-Fi-tuotteita on tullut markkinoille, mutta niiden hinnat ovat vielä tavalliselle kuluttajalle melko korkeat.

Yksi tunnetuimmista VLC:hen ja Li-Fiin keskittyvistä yrityksistä on vuonna 2012 perustettu pureLiFi. Edinburghin yliopiston professori Harald Haas, joka on yksi pureLifin perustajista, käytti vuonna 2011 ensimmäistä kertaa termiä Li-Fi kuvaamaan järjestelmää, jossa ledejä käytetään sekä valaistukseen että tiedonsiirtoon. Yrityksen tavoitteena on sulauttaa Li-Fi-teknologia puhelimiin ja kannettaviin tietokoneisiin [13]. PureLiFin ensimmäinen

mäinen kattoon asennettava Li-Fi-yksikkö oli Li-Flame, jonka tiedonsiirtonopeus oli korkeintaan 10 Mb/s. Vuonna 2016 pureLiFi esitteli Mobile World Congressissa (MWC) Barcelonassa uudemman sukupolven ajureita ja päätelaitteita, jotka tukevat kaksisuuntaista yhteyttä ja montaa samanaikaista käyttäjää yhdellä tukiasemalla [10]. Yritys esitteli viimeisintä laitteistoaan vuoden 2019 MWC:ssä. Kannettavaan tietokoneeseen ja puheliin integroiduilla Li-Fi-päätelaitteilla saatiin latausnopeudeksi 1 Gb/s ja lähetysnopeudeksi alle 350 Mb/s [14]. PureLiFi on onnistunut viime vuosina pienentämään varsinkin päätelaitteidensa kokoa, mikä edesauttaa järjestelmän integroimista kannettaviin laitteisiin. Tiedonsiirto ei tapahdu pelkästään näkyvällä valolla, vaan päätelaitteessa on ylälinkkiä varten infrapunälähetin, jonka signaali vastaanotetaan tukiasemassa. Yritys tarjoaa yrityksille Li-Fi-aloituspakettia (starter kit) 2500 punnan hintaan. Aloituspaketti sisältää kaksi Li-Fi-päätelaitetta ja tukiasemavalaisinta. Neljän päätelaitteen ja tukiasemavalaisimen paketti maksaa puolestaan 5000 punttaa [15]. PureLifin LiFi-XC-päätelaite, joka sisältää fotodiodi-ilmaisimen sekä infrapunälähtetimen, on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. PureLifin tietokoneen USB-porttiin liitettävä LiFi-XC-päätelaite.

Toisella Li-Fi-teknologiaan keskittyvällä yrityksellä Oledcommilla on kehitteillä erilaisia käyttökohteita Li-Fille. Esimerkiksi navigointi ja käyttäjien seuranta sisätiloissa on yksi mahdollinen käyttökohde Li-Fille. Sisätiloissa tiheään asennetut kattovalaisimet toimisivat tukiasemina, joiden avulla voitaisiin seurata esimerkiksi kaupan asiakkaiden reittejä kaupan sisällä ostoskärryihin asennetun lähtetimen avulla. Tällä tavoin kerätyn datan perusteella kauppa saisi paremman kuvan asiakkaidensa kulutustottumuksista ja voisi tällä tavalla kohdistaa tehokkaammin tarjouksia ja mainontaa oikeisiin tuotteisiin. Toisaalta järjestelmä näyttäisi asiakkaalle hänen sijaintinsa liikkeessä ja reitin asiakkaan haluaman tuotteen luo. Myös esimerkiksi sairaaloissa Li-Fi-järjestelmä auttaisi potilaiden tilan seuraamisessa heidän sijainnistaan riippumatta. Lisäksi se helpottaisi erilaisten laitteiden paikallistamista tarpeen mukaan. Li-Fi-järjestelmä tarjoaisi paikannuksen lisäksi

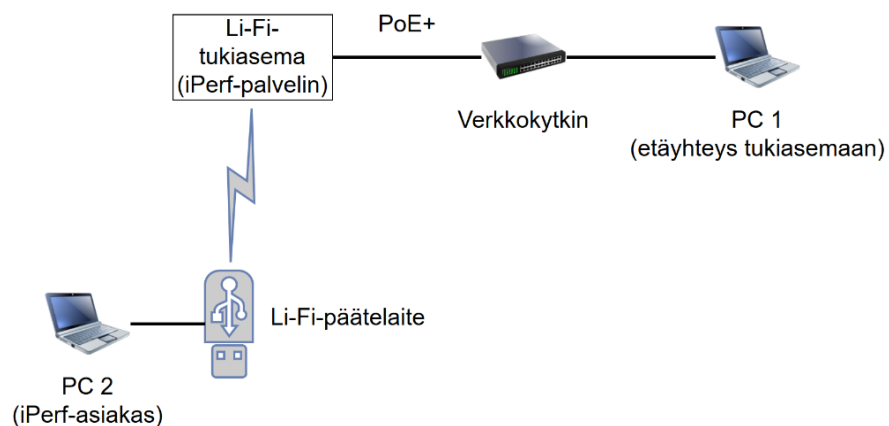
turvallisen yhteyden esimerkiksi toimistoissa. Jokaisella työntekijällä olisi oma turvattu yhteys työpisteen oman valaisimen, kuten pöytälampan, kautta. Li-Fi käyttökohteet eivät rajoitu vain sisätiloihin, vaan Oledcomm suunnittelee, että järjestelmiä voisi käyttää myös ulkovalaisimien, kuten katulamppujen, avulla. Yrityksen mukaan Li-Fi-järjestelmät tulisivat toimimaan senttimetrien tarkkuudella, mikä mahdollistaisi erittäin tarkat paikannuspalvelut [16]. Valaistus on yksi mahdollinen yhteystapa tulevaisuuden 5G- ja IoT-verkoissa.

4. MITTAUKSET

4.1 Laitteisto ja mittausympäristö

Mittaukset suoritettiin Tampereen yliopiston Hervannan kampuksella Tietotalon opiskelijalaboratoriotiloissa. Laboratorion valaistus vastaa tavallisten toimistotilojen kattovalaistusta, mikä on toivottavaa, sillä toimistot ovat yksi VLC-järjestelmien mahdollisista käyttöympäristöistä.

Mittauksissa käytettiin pureLiFin LiFi-XC -laitteistoa. LiFi-XC koostuu VLC-tukiasemasta, johon kuuluu led-ohjain sekä -valaisin, ja USB-porttiin liitettävästä Li-Fi-päätelaitteesta, jossa on fotodiodi-ilmaisimien lisäksi infrapunalähetin. Lisäksi mittauslaitteistoon kuului kaksi kannettavaa tietokonetta ja verkkokytkin. Mittausympäristö on kuvattu lohkokaaviona kuvassa 5. Verkkokytkin ja siihen kytketty tietokone (PC 1) on esitetty kuvassa 6.



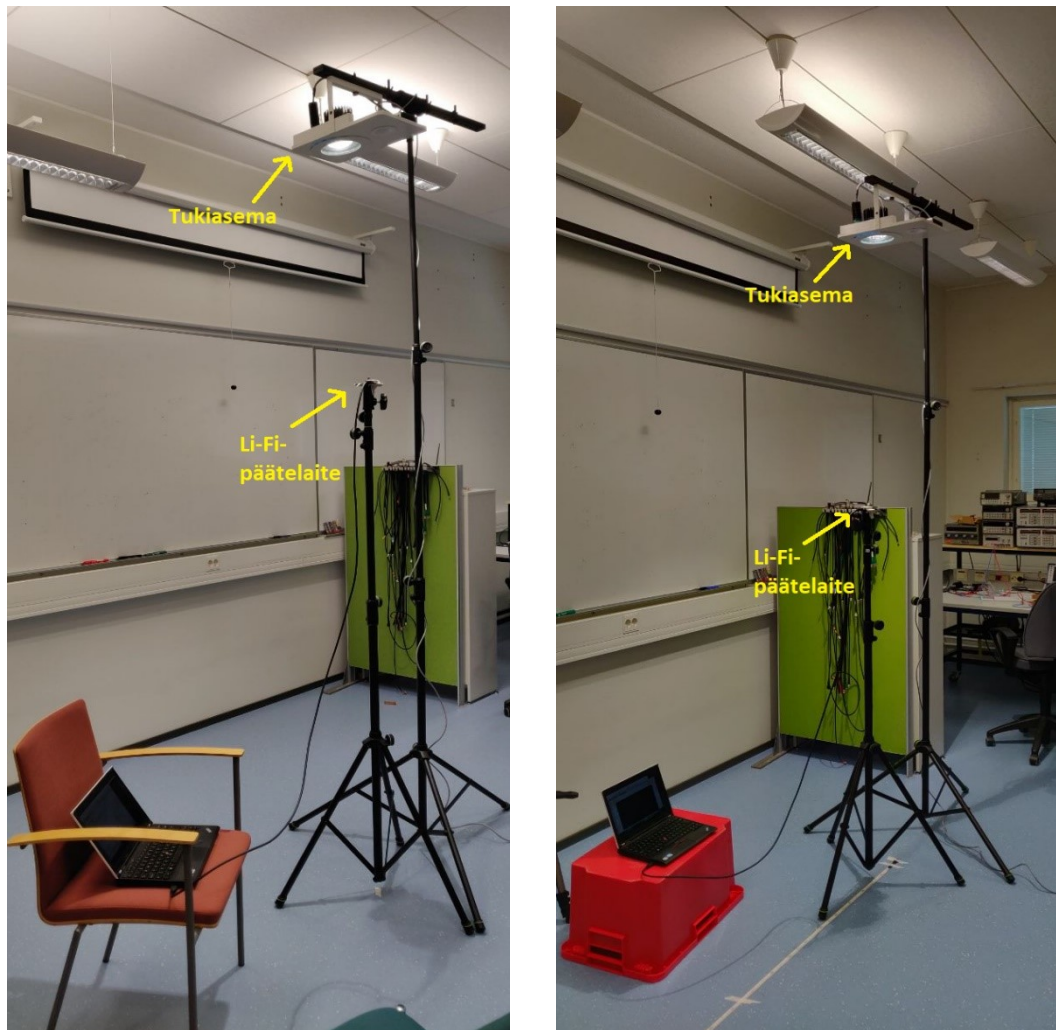
Kuva 5. Mittausympäristö lohkokaaviona.



Kuva 6. VLC-tukiasemaa ohjaava tietokone (PC 1) ja verkkokytkin.

Tukiasemaa ohjattiin pääteyhteydellä Windows 7 -pohjaisesta tietokoneesta (PC 1) käsin PuTTY-ohjelmistolla. Tietokone yhdistettiin HPE OfficeConnect 1920S (JL383A) -verkkokyttimeen, joka tukee PoE+-standardia. Tämän ansiosta sitä syöttämään tukiasemavalaisimelle virta. Tietokoneen ja tukiaseman sekä kytkimen välisissä Ethernet-kytkennöissä käytettiin Cat6-verkkokaapeleita. Tietokone ja kytkin on esitetty kuvassa 6. Tukiasemaa varten rakennettiin säädettävä teline, jonka avulla valaisin saatiin halutulle korkeudelle. Lisäksi valaisin voitiin asettaa telineeseen sivuttaisesti, mikä mahdollisti mittaukset pidemmällä matkalla. Li-Fi-päätelaite oli puolestaan kytketty Windows 10 -pohjaiseen tietokoneeseen (PC 2), johon oli asennettu pureLiFin tarjoamat ajurit päätelaitetta varten. Myös päätelaite kiinnitettiin erilliseen kolmijalkaan, jolloin se saatiin asetettua vakaasti halutulle etäisyydelle tukiasemasta.

Työssä suoritettiin kolme eri mittaustapausta. Ensin asetettiin päätelaite suoraan tukiasemavalaisimen alle. Tukiasema oli asennettu osoittamaan alaspäin noin 259 cm:n korkeudelle lattiasta, jolloin tukiasema oli suurin piirtein samalla korkeudella kuin muutkin laboratorion kattovalaisimet. Ensimmäinen mittaustapausta on esitetty kuvassa 7a ja sen mittaustulokset on raportoitu luvussa 4.2.1.



Kuva 7. a) Mittaus suoraan tukiaseman alapuolelta siirtäen päätelaitetta korkeussuunnassa, ja b) mittaus siirtäen päätelaitetta sivuun tukiaseman valokeilasta lattiaan merkittyä valkoista viivaa pitkin.

Ensimmäinen mittausetäisyys määritettiin siirtämällä päätelaitetta lähemmäs tukiasemaa niin kauan, kunnes päätelaite saturoitui ja yhteys katkesi. Tämä tapahtui noin 80 cm:n etäisyydellä. Mittauksia tehtiin 10 cm:n välein lattiaan saakka, jolloin tukiaseman ja päätelaitteen etäisyys oli noin 259 cm.

Seuraava mittaustapa oli sivuttaissuuntainen mittaus. Mittaus aloitettiin jälleen suoraan tukiaseman alapuolelta päätelaitteen ollessa 150 cm korkeudella lattiasta. Tällä kertaa päätelaitetta siirrettiin sivulle 20 cm:n askelin yhteyden katkeamiseen saakka, mikä tapahtui päätelaitteen ollessa 80 cm sivussa. Jokainen mittaus tehtiin kahteen kertaan, ensin huone valaistuna ja sitten ilman muita valoja taustavalaistuksen vaikutuksen testaamiseksi. Toinen mittaustapa on esitetty kuvassa 7b ja sen mittaustulokset on raportoitu luvussa 4.2.2.

Viimeiseksi sekä päätelaite että tukiasema asetettiin vaakatasoon 150 cm:n korkeudelle lattiasta, jotta yhteyttä voitiin mitata pidemmillä etäisyyksillä. Mittaus aloitettiin 80 cm:n

etäisyydeltä 30 cm:n välein. Mittaukset tehtiin taas kahteen kertaan, jotta saatiin mitattua yhteys sekä pimeässä että valaistussa tilassa. 530 cm:n jälkeen päätelaite jouduttiin siirtämään laboratorion ulkopuolelle käytävälle, minkä vuoksi mittauksia ilman valoja ei voitu enää suorittaa. Suurin mitattu etäisyys päätelaitteen ja vastaanottimen välillä oli kahdeksan metriä. Viimeinen mittaustapaus on esitetty kuvassa 8 ja sen mittaustulokset on raportoitu luvussa 4.2.3.



Kuva 8. Mittaus vaakatasossa.

VLC-yhteyden mitattavia ominaisuuksia olivat ala- ja ylälinkin kaistanleveydet, pakettihävikki, yhteyden teoreettinen maksiminopeus (link speed), signaalin voimakkuus prosenttiarvona sekä viive. Näiden ominaisuuksien mittaamisessa käytettiin Windowsin komentorivikomentoja sekä iPerf-ohjelmistoa, joka oli asennettu myös tukiasemaan. Päätelaitteeseen liitettyssä tietokoneessa (PC 2) käytettiin pureLiFin suosittelemaa iPerfin versiota 2.0.9. Mittauksissa tukiasema määritettiin iPerfissä palvelimeksi ja päätelaite asiakkaaksi. Mittauksissa käytetyt komentorivikomennot ja tekstitiedostoihin kirjoittaminen suoritettiin ohjelman 1 mukaisella komentojonotiedostolla (Windowsin BAT-tiedosto).

```

SET /P Input=Nimea mittaus:
mkdir %Input%

// Aikaleimat
set time_hh=%time:~0,2%
if %time_hh% lss 10 (set time_hh=0%time:~1,1%)
set time_mn=%time:~3,2%
set time_ss=%time:~6,2%
set time_ms=%time:~9,2%

// Kirjoitetaan komentojen tulokset tekstitiedostoihin
echo %time_hh%:%time_mn%:%time_ss%:%time_ms% >> %Input%\%Input%_LiFi_in-
terface_.txt
echo %time_hh%:%time_mn%:%time_ss%:%time_ms% >> %Input%\%In-
put%_LiFi_linkspeed_.txt

// Tehdään viisi mittausa signaalin voimakkuudelle ja linkspeedille
FOR /L %%n in (1,1,5,) DO (

netsh WLAN show interfaces >> %Input%\%Input%_LiFi_interface_.txt

wmic NIC where Name="purelifi LiFix" get Speed >> %Input%\%In-
put%_LiFi_linkspeed_.txt
echo. >> %Input%\%Input%_LiFi_linkspeed_.txt
)

// Aikaleimat
set time_hh=%time:~0,2%
if %time_hh% lss 10 (set time_hh=0%time:~1,1%)
set time_mn=%time:~3,2%
set time_ss=%time:~6,2%
set time_ms=%time:~9,2%

// iPerfillä kaistanleveydet ja pakettihävikki, UDP-protokollalla 50 me-
gabitin kaistanleveydellä, 30 sekunnin mittaus
echo %time_hh%:%time_mn%:%time_ss%:%time_ms% >> %Input%\%In-
put%_LiFi_bandwidth_.txt
iperf -i1 -u -c 192.168.1.100 -b50m -t30 -e >> %Input%\%Input%_LiFi_band-
width_.txt

// Aikaleimat
set time_hh=%time:~0,2%
if %time_hh% lss 10 (set time_hh=0%time:~1,1%)
set time_mn=%time:~3,2%
set time_ss=%time:~6,2%
set time_ms=%time:~9,2%

// Viive, edestakaiseen matkaan kulunut aika
echo %time_hh%:%time_mn%:%time_ss%:%time_ms% >> %Input%\%In-
put%_LiFi_rtt_.txt
ping -n 20 192.168.1.100 >> %Input%\%Input%_LiFi_rtt_.txt

```

Ohjelma 1. Mittauksissa käytetyn komentojonotiedoston ohjelmakoodi.

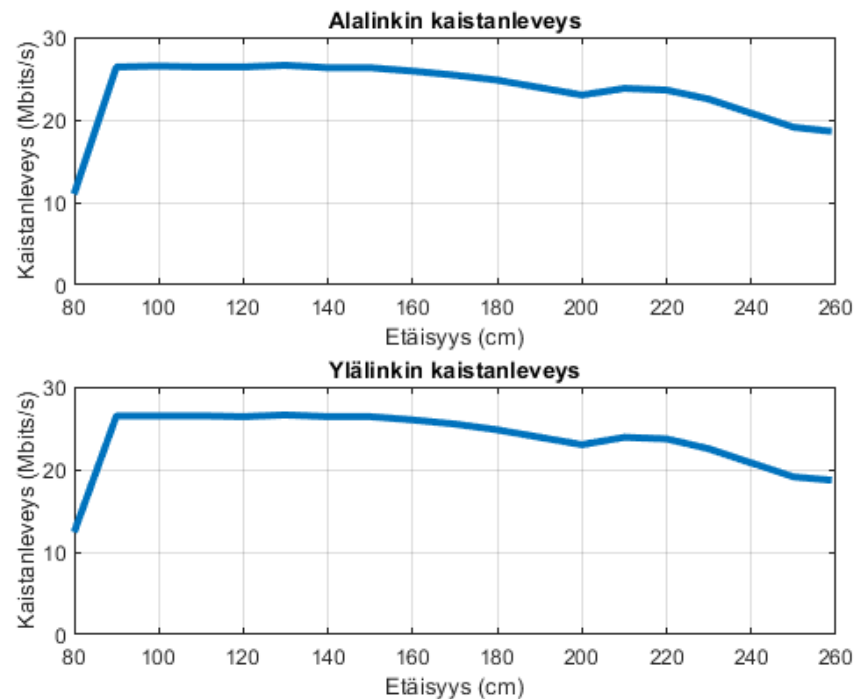
Komentojonotiedosto ajettiin joka mittausetäisyydellä. Mittaustulokset koottiin yhteen ja niistä tehtiin graafinen esitys Matlab-ohjelmistolla.

4.2 Mittaustulokset

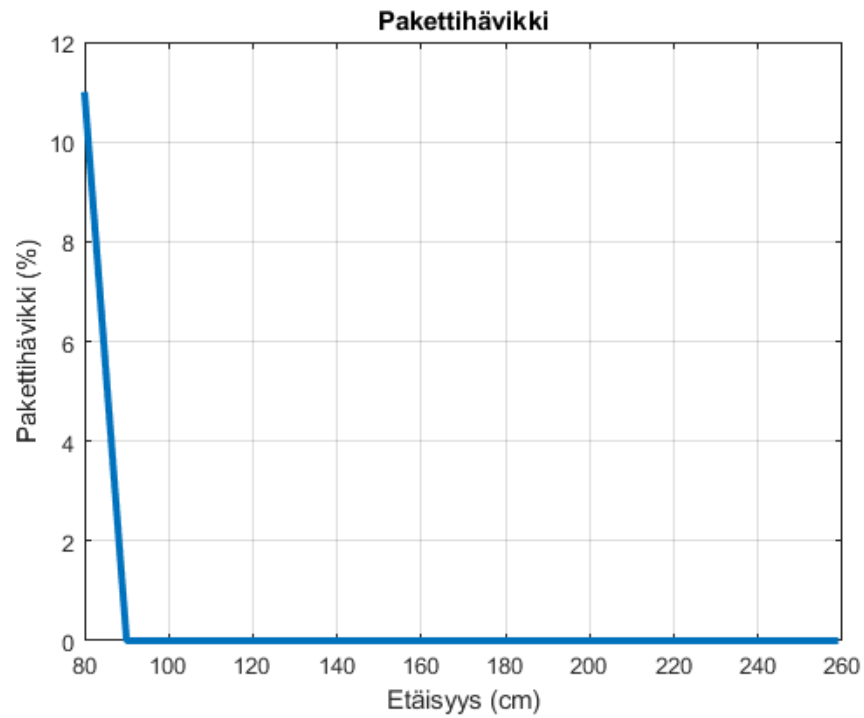
Kun mittaustulokset oli saatu graafiseen muotoon, päädyttiin tulokseen, että mielenkiintoisinta mittaustuloksia olivat ala- ja ylälinkin kaistanleveys, pakettihävikki sekä yhteyden teoreettinen maksiminopeus. Viive oli kaikissa mittauksissa noin 15 ms ja signaalin voimakkuus sai vain vähän eri arvoja eri mittauksissa.

4.2.1 Suora mittaus

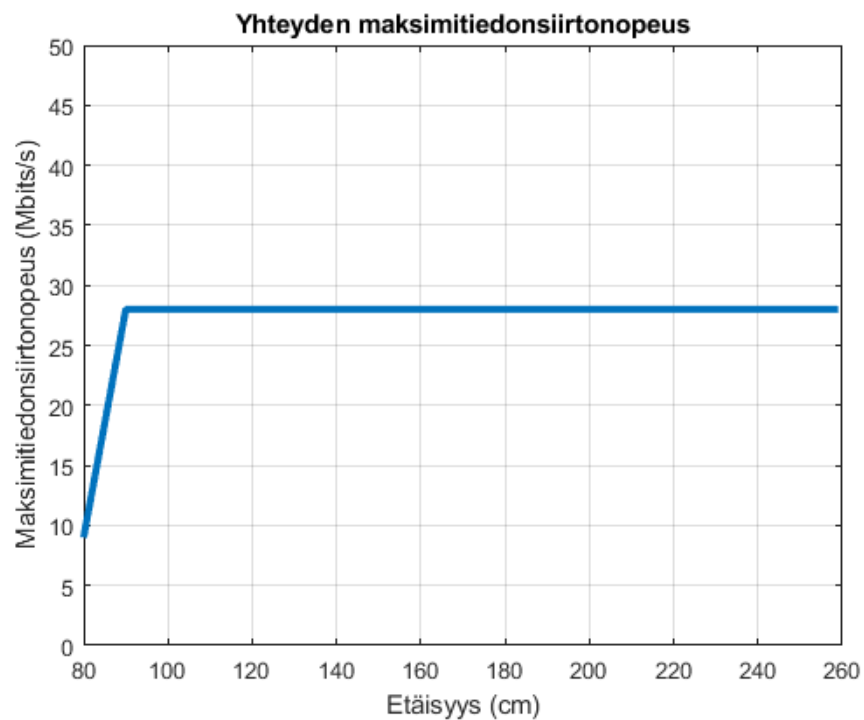
Suorassa mittauksessa tehtiin 19 mittausta. Mittausdata on esitetty kuvissa 9–11.



Kuva 9. Ala- ja ylälinkin kaistanleveydet suorassa mittauksessa.



Kuva 10. Pakettihävikki suorassa mittauksessa.



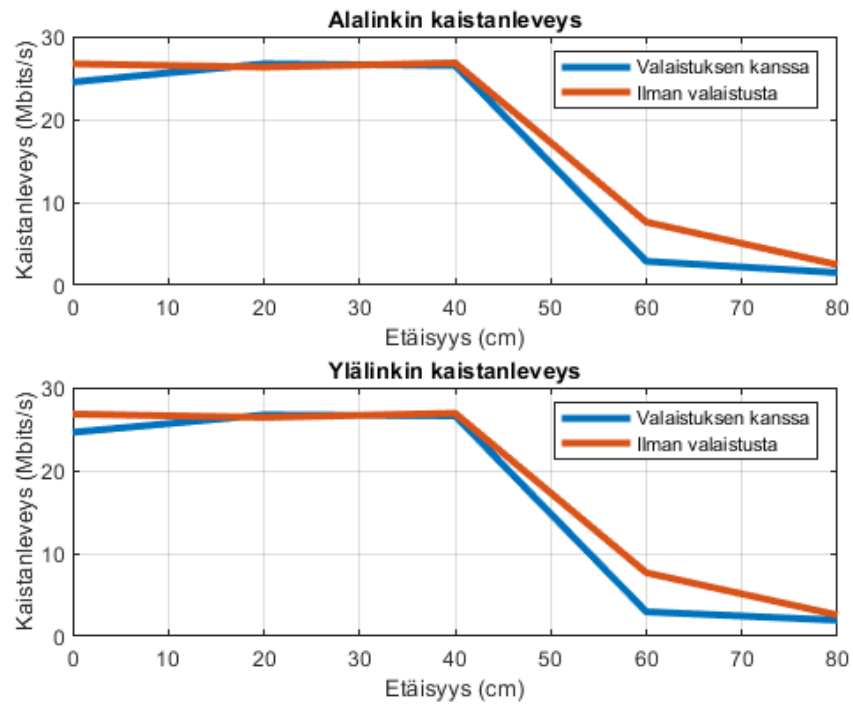
Kuva 11. Teoreettinen maksimitiedonsiirtonopeus suorassa mittauksessa.

Kuvista 9–11 huomataan, että liian lähellä tukiasemavalaisinta päätelaite saturoituu, mikä heikentää yhteyttä. 90–100 cm:n etäisyydellä ala- ja ylälinkkien kaistanleveys kasvaa huippuarvoonsa, joka on noin 27 Mbit/s. Myös pakettihävikki ja teoreettinen maksimitiedonsiirtonopeus saavat parempia arvoja, kun tukiaseman ja päätelaitteen

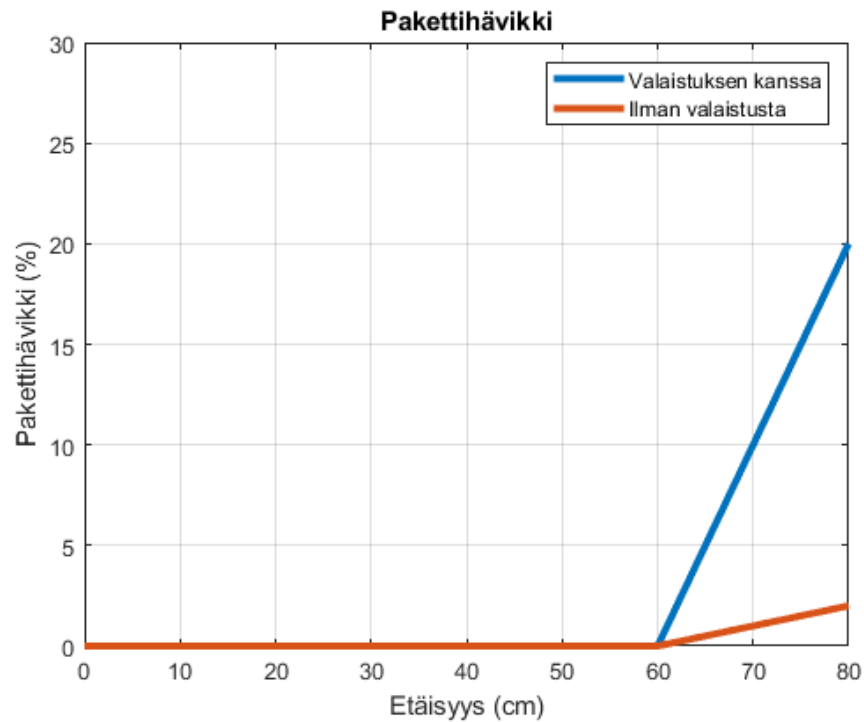
etäisyys kasvaa yhteen metriin. Kaistanleveydet pienenevät hitaasti, kunnes jälleen kasvavat noin kahden metrin etäisyydellä.

4.2.2 Sivuttaismittaus

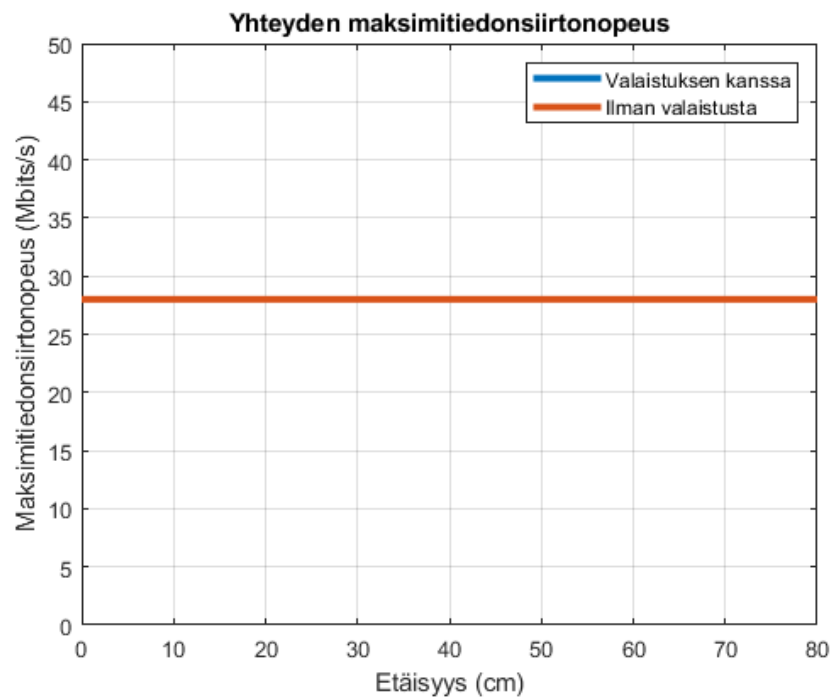
Sivuttaismittauksessa tehtiin mittauksia viidellä eri etäisyydellä sekä valot päällä että ilman valoja. Mittausdata on esitetty kuvissa 12–14.



Kuva 12. Ala- ja ylälinkin kaistanleveydet valojen kanssa ja ilman valoja sivuttaismittauksessa.



Kuva 13. Pakettihävikki valojen kanssa ja ilman valoja sivuttaismittauksessa.



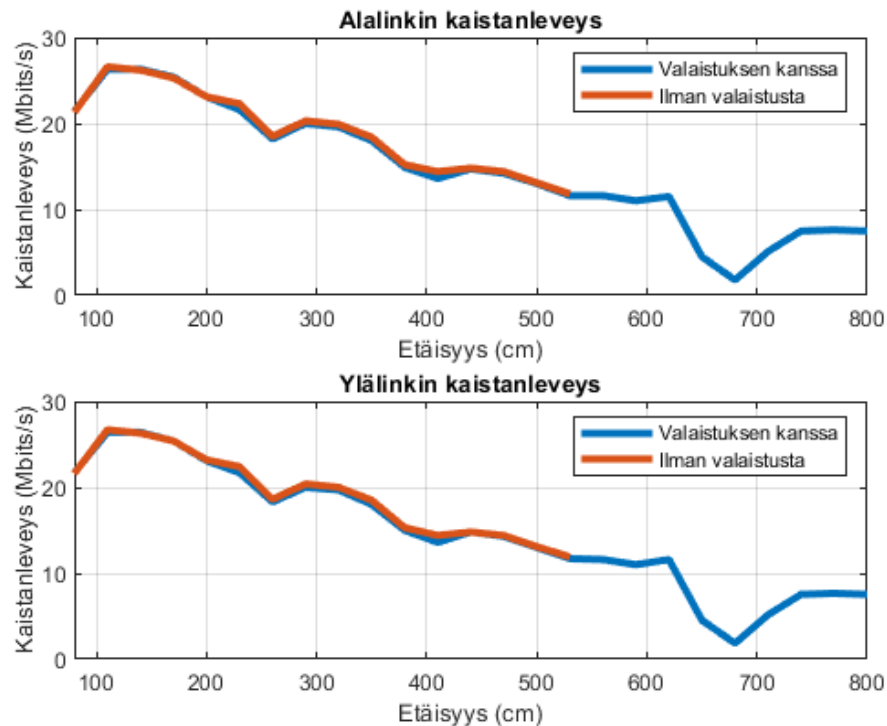
Kuva 14. Teoreettinen maksimitiedonsiirtonopeus sivuttaismittauksessa.

Sivuttaismittauksessa yhteys toimi tasaisesti, kunnes etäisyydellä 40–60 cm yhteys heikkeni merkittävästi, kaistanleveys pieneni ja pakettihävikki kasvoi. Etäisyyden ollessa 100 cm yhteys oli jo katkennut kokonaan. PureLiFin tarjoamassa taulukossa tukiaseman teoreettiseksi toimintasäteeksi 125 cm:n korkeuserolla on ilmoitettu noin 81 cm [17]. Mit-

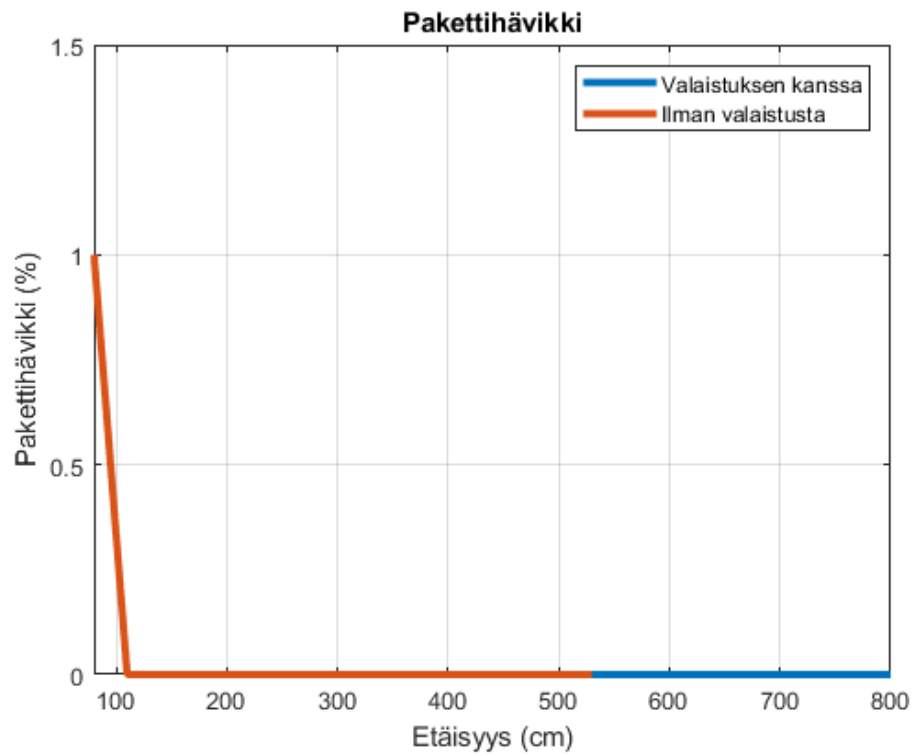
tauksissa korkeusero oli noin 110cm, joten tulokset antavat samanlaisen kuvan tukiaseman toimintasäteestä. Teoreettinen maksimitiedonsiirtonopeus säilyi kuitenkin samana koko mittauksen ajan. Yhteyden heiketessä mittauksilokset ilman taustavalaistusta kertovat, että huonoissa olosuhteissa taustavalaistuksen aiheuttaman kohinan poistaminen parantaa yhteyden laatua jonkin verran.

4.2.3 Vaakamittaus

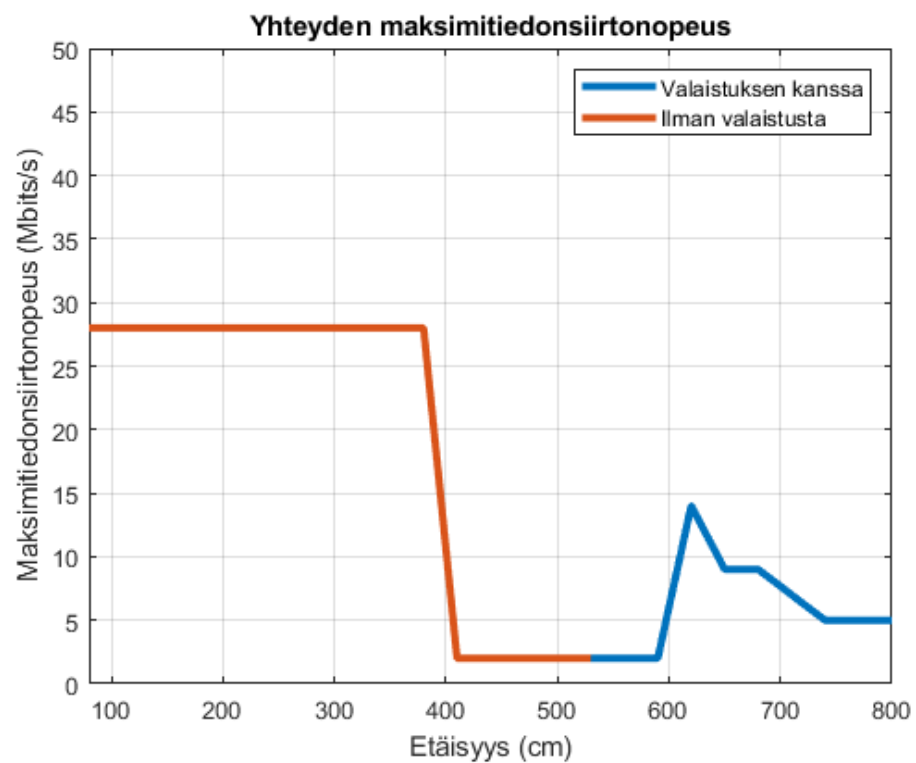
Vaakamittauksissa suoritettiin yhteensä 24 mittausta. Lyhyillä etäisyyksillä mittaukset suoritettiin kahdesti, ensin valot päällä ja sitten ilman valoja. Opiskelijalaboratorion tilan loppuessa 530 cm:n kohdalla avattiin ovi ja siirrettiin päätelaite käytävälle, jolloin pimeämittauksia ei voitu enää suorittaa käytävävalaistuksen vuoksi. Vaakamittausten mitausdata on esitetty kuvissa 15–17.



Kuva 15. Ala- ja ylälinkin kaistanleveydet vaakamittauksessa.



Kuva 16. Pakettihävikki vaakamittauksessa.



Kuva 17. Teoreettinen maksimitiedonsiirtonopeus vaakamittauksessa.

Kuvista 15–17 nähdään, että yhteyden kaistanleveys oli jälleen hieman parempi ilman taustavalaistusta, mutta pakettihävikki ja teoreettinen maksimitiedonsiirtonopeus säilyivät samoina eri valaistusolosuhteissa. Suoran mittauksen tavoin kaistanleveys ensin pieneni välillä 620–680 cm, minkä jälkeen se kasvoi jälleen. Se, että tukiaseman valo tuli oviaukon läpi valaistussa käytävässä olevaan päätelaitteeseen, saattoi vaikuttaa tuloksiin jollain tavalla. Toinen mielenkiintoinen huomio on se, että noin välillä 400–600 cm yhteyden teoreettinen maksimitiedonsiirtonopeus näytti olevan vain noin 2,5 Mbit/s, kun puolestaan kaistanleveys samalla välillä oli yli 10 Mbit/s. Tarkkaa syytä tälle on vaikea sanoa, mutta teoreettisen maksimitiedonsiirtonopeuden (link speed) esityksessä oli todennäköisesti jokin häiriö kyseisellä välillä, sillä 600 cm:stä eteenpäin mitatut arvot näyttivät pienenevän melko tasaisesti etäisyyden kasvaessa.

5. YHTEENVETO

Työssä tarkasteltiin näkyvällä valolla tapahtuvan langattoman tiedonsiirron (VLC) perusteita sekä optista langatonta tiedonsiirtoa yleisesti. Lisäksi tehtiin katsaus VLC:tä tutkiviin ja kehittäviin organisaatioihin ja yrityksiin. Lopuksi tehtiin vielä muutamia perustavanlaatuisia mittauksia pureLiFi-yritykseltä hankitulla testilaitteistolla, jotta saatiin realistista kuvaa VLC-järjestelmän suorituskyvystä aidoissa toimintaolosuhteissa.

Aiheesta tehtyjen tutkimusten ja työssä kerätyn mittausdatan perusteella voidaan sanoa, että VLC on varteenotettava vaihtoehto esimerkiksi kotien ja toimistojen langattomien lähiverkkojen toteutuksissa. Mittauksissa, joissa muun muassa simuloitiin optimaalista käyttötilannetta, jossa päätelaite on suoraan tukiasemavalaisimen alla, testilaitteistolla tiedonsiirtonopeudeksi saatiin noin 20–25 Mbit/s, joka on riittävä ainakin tavalliseen internetkäyttöön. Yhteyden reagointi häiriöihin, kuten varjostumiseen, jäi vielä tarkemmin selvittämättä, mutta se voi olla merkittävä haaste esimerkiksi ruuhkaisissa tiloissa toimivissa VLC-järjestelmissä.

Tulevaisuudessa VLC saattaa olla yksi mahdollinen ratkaisu IoT:n myötä kasvavaan taajuuskaistan tarpeeseen, joka johtuu laitemäärän kasvusta langattomissa verkoissa. VLC:llä on potentiaalia tarjota esimerkiksi tarkkaa sisätilapaikannusta sekä edullisia ja monikäyttöisiä tukiasemia, mutta vasta tulevana vuosina nähdään, tuleeko VLC:stä laajasti käytetty langaton verkkotekniikka. Nykytilassaan VLC-järjestelmät eivät vielä juurikaan tarjoa merkittävää hyötyä verrattuna RF-järjestelmiin esimerkiksi kustannustehokkuuden sekä luotettavan ja nopean yhteyden osalta.

LÄHTEET

- [1] Z. Ghassemlooy, S. Zvanovec, M.A. Khalighi, W.O. Popoola, J. Perez, Optical wireless communication systems, *Optik*, vol. 151, December 2017, pp. 1–6, DOI: 10.1016/j.ijleo.2017.11.052.
- [2] M.A. Khalighi, M. Uysal, Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 4, June 2014, pp. 2231–2258, DOI: 10.1109/COMST.2014.2329501.
- [3] A. Jovicic, J. Li, T. Richardson, Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market, *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, December 2013, pp. 26–32, DOI: 10.1109/MCOM.2013.6685754.
- [4] T. Paukku, Kattolamppu välittää pian dataa supernopeasti – Led-valo siirtää bittejä 10 000 kertaa nopeammin kuin wi-fi-verkot nyt, *Helsingin Sanomat*, 23.1.2019, <https://www.hs.fi/tiede/art-2000005974148.html> (13.2.2019).
- [5] T. Val, F. Peyrard, M. Mission, Study and simulation of the infrared WLAN IrDA: an alternative to the radio, *Computer Communications*, vol. 26, no. 11, July 2003, pp. 1210–1218, DOI: 10.1016/S0140-3664(02)00255-4.
- [6] Z. Ghassemlooy, S. Arnon, M. Uysal, Z. Xu, J.Cheng, Emerging Optical Wireless Communications-Advances and Challenges, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 9, September 2015, pp. 1738–1749, DOI: 10.1109/JSAC.2015.2458511.
- [7] I. Marin-Garcia, V. Guerra, P. Chavez-Burbano, J- Rabadan, R. Perez-Jimenez, Evaluating the risk of eavesdropping a visible light communication channel, *IET Optoelectronics*, vol. 12, no. 6, November 2018, pp 289–292, DOI: 10.1049/iet-opt.2018.5052.
- [8] K.H. Shakthi Murugan, M. Sumanthi, Design and Analysis of 5G Optical Communication System for Various Filtering Operations using Wireless Optical Transmission, *Results in Physics*, vol. 12, March 2019, pp. 460–468, DOI: 10.1016/j.rinp.2018.10.064.
- [9] H. Chowdhury, Data download on the move in visible light communications: Design and Analysis, *Väitöskirja, Oulun yliopisto, Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta*, 2016, <http://urn.fi/urn:isbn:9789526213620>.
- [10] I. Stevanović, OFCOM-Report Light Fidelity (LiFi), Federal Office of Communication, April 2017.
- [11] D. Minoli, K. Sohraby, B. Occhiogrosso, IoT Considerations, Requirements, and Architectures for Smart Buildings—Energy Optimization and Next-Generation Building Management Systems, *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 1, February 2017, pp. 269–283, DOI: 10.1109/JIOT.2017.2647881.
- [12] N. Serafimovski, T. Baykas, V. Jungnickel, Status of IEEE 802.11 Light Communication TG, http://www.ieee802.org/11/Reports/tgbb_update.htm (28.3.2019).
- [13] pureLiFi, <https://purelifi.com> (28.3.2019).

- [14] T. Newton, Pure LiFi demos 1Gbps over visible light at Mobile World Congress, Trusted Reviews, 4.3.2019, <https://www.trustedreviews.com/news/pure-lifi-giga-bit-3668418> (14.3.2019).
- [15] Li-Fi Tech News, <https://www.lifitn.com/> (3.6.2019).
- [16] Oledcomm, <https://www.oledcomm.net/> (10.4.2019).
- [17] pureLiFi, Access Point Network, Electrical and Physical Requirements, 8 p.